# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
# MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.893 DOI 10.12737/20214

## Исследование режимных факторов в автобалансирующем устройстве стиральной машины в резонансной зоне[*]

**С. Н. Алехин[1], С. П. Петросов[2], А. С. Алехин[3**]**

[1, 2, 3] Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, г. Шахты, Российская Федерация

## Investigation of operation factors in the self-balancing device of the washing machine in resonance zone [***]

**S. N. Alekhin[1], S. P. Petrosov[2], A. S. Alekhin[3**]**

[1, 2, 3] Institute of Service and Business (DSTU branch), Shakhty, Russian Federation

Целью работы является решение вопросов, связанных с повышением надежности, экономичности и безопасности современных стиральных машин на основе снижения динамических нагрузок в период центробежного отжима. Рассмотрены основы формирования режимных факторов в период прохождения резонансной зоны при центробежном отжиме в жидкостном автобалансирующем устройстве (АБУ) с вытесняемой жидкостью, на конструкцию которого был получен ряд патентов. Проведен сравнительный анализ реализации функции автобалансирующего устройства для условий формирования адекватного силового отклика на входное силовое воздействие для двух установленных ранее наиболее рациональных условий: для силы, возникающей при резонансе, и при достижении максимальной неуравновешенной силы. Получены зависимости величины перемещения внутренней емкости АБУ от конструктивных параметров автобалансирующего устройства и системы подвески моечного узла, а также режимных параметров процесса отжима. Результаты исследования представлены в виде графиков. Анализ итогов работы позволил сделать выводы о перспективности использования полученных данных для обеспечения наибольшей эффективности процесса уравновешивания массы неравномерно распределенных текстильных изделий в барабане при отжиме.

**Ключевые слова:** колебания стиральных машин, автобалансирующее устройство, резонанс, уравновешивание, виброактивность, центробежный отжим, вибрация.

The paper objective is to solve the issues related to the increase of reliability, profitability, and safety of modern washing machines on the basis of decrease in dynamic loads under whizzing. The principles of forming operation factors in the liquid self-balancing device (SBD) with the displaced fluid (on which design a number of patents are received) when passing a resonance zone under whizzing are considered. A comparative analysis of the SBD function implementation for the conditions of forming an adequate force response to the force input for two earlier established most rational conditions: for the force generated by resonance, and if reached the maximum unbalanced force, is carried out. The dependences of the SBD internal capacity traverse on the design factors of the SBD and the cleaning unit suspension system, and also on the operation parameters of the extraction process, are obtained. The research results are submitted in diagrams. The results analysis allows drawing the conclusions on the obtained data application perspectiveness to ensure maximum efficiency of the process of balancing irregular masses of textiles in the drum during the whizzing cycle.

**Keywords**: vibrations of washing machines, self-balancing device, resonance, balancing, vibroactivity, whizzing, vibration.

**Введение.** В настоящее время снижение виброактивности при центробежном отжиме является одним из приоритетных вопросов, стоящих перед разработчиками стиральных машин барабанного типа. Актуальность данной проблемы обусловлена необходимостью обеспечения более высоких показателей надежности, безопасности и экономичности стиральных машин, а также снижения вредного воздействия вибрации и шума на человека.

Эффективным направлением снижения виброактивности стиральных машин является использование жидкостных автобалансирующих устройств (АБУ) — в частности, АБУ с вытесняемой жидкостью [1–4].

Вопросам исследования жидкостных АБУ, применяемых в стиральных машинах, посвящен ряд научных публикаций. При этом исследователи отмечают недостаточность имеющейся в настоящее время информации о дисбалансных характеристиках отклика системы и стабильности работы устройства [5, 6].

Исследования, проведенные авторами данной статьи, показали, что полное уравновешивание неуравновешенных масс отжимаемых изделий в стиральных машинах, использующих АБУ с вытесняемой жидкостью, возможно лишь при некотором одном значении частоты вращения барабана при соответствующих конструктивных параметрах

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

[**] E-mail: alex_cn@mail.ru, petrosov217@sssu.ru, alekalh@yandex.ru

[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

АБУ [7,8]. Частоты вращения барабана, наиболее рациональные для реализации функции АБУ, были установлены в случаях, когда:

— возмущающая сила достигает максимального значения;

— в процессе разгона барабана происходит переход через резонансную зону.

Результаты исследования уравновешивающих сил в АБУ при максимальной неуравновешенной силе были представлены в статье [8].

Однако можно предположить, что в некоторых случаях более актуальным является вопрос обеспечения максимального уравновешивания в период прохождения колебательной системы стиральной машины через резонансную зону при разгоне барабана в процессе отжима.

**Основная часть.** Из теории колебаний известно, что амплитуда колебаний $A$ упруго установленного или подвешенного тела массой $M$ в случае вынужденных гармонических колебаний с частотой $\omega$ достигает максимального значения $A_{max}$ при резонансной частоте колебаний $\omega_p$, несколько меньшей частоты собственных незатухающих колебаний $\omega_0$:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\Omega^2 - \beta^2}\,, \tag{1}$$

где $\omega_0 = \sqrt{\dfrac{c_в}{M}}$ — частота свободных незатухающих (собственных) колебаний системы (то есть при $\beta = 0$); $c_в$ — жесткость упругих элементов системы подвески (виброизоляции); $M$ — масса подвесной части (виброизолированного моечного узла); $\beta = \dfrac{b}{2M}$ — коэффициент затухания; $b$ — коэффициент силы трения или коэффициент диссипации демпферов системы подвески; $\Omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ — частота свободных затухающих колебаний системы.

Для удобства расчетов в формуле (1) заменим частоты на заведомо известные (задаваемые) параметры: жесткость упругих элементов системы подвески (системы виброизоляции) $c_в$, коэффициент диссипации демпферов системы подвески $b$. Тогда с учетом приведенных выше соотношений получим:

$$\omega_p = \frac{1}{M}\sqrt{Mc_в - \frac{b^2}{2}}\,. \tag{2}$$

Здесь масса $M$ подвесной части стиральной машины складывается из следующих составляющих:

$$M = M_0 + m_б + m_ж, \tag{3}$$

где $M_0 = (M_{м.у} + m_{п.в})$ — масса незагруженного моечного узла, состоящая из массы собственно моечного узла $M_{м.у}$ и массы противовесов $m_{п.в}$ (как правило, масса противовесов находится в пределах $m_{п.в} = 20…30$ кг, а общая масса незагруженного моечного узла составляет $M_0 = 50…75$ кг [9]); $m_б$ — масса отжимаемых изделий в данный произвольный момент времени; $m_ж$ — масса уравновешивающей жидкости.

Предполагается, что масса $m_{п.в}$ противовесов при использовании АБУ может быть снижена, а в некоторых случаях возможно использование подвесной части без противовесов. В этом случае масса незагруженного моечного узла $M_0 = 30…45$ кг.

Вместе с тем использование жидкостного АБУ предусматривает наличие уравновешивающей жидкости, что приводит к увеличению массы $M_0$ подвесной части на величину $m_ж$. Проведенные ранее исследования показали, что масса $m_ж$ уравновешивающей жидкости находится в пределах $m_ж = 4{,}5…12$ кг [10].

Масса $m_б$ отжимаемых изделий и эксцентриситет $r_{е.б}$ в произвольный момент времени определяется по методикам, приведенным в диссертациях И. В. Фетисова [11] и А. С. Алехина [12].

Как показали исследования, суммарная жесткость $c_в$ упругих элементов системы подвески (виброизоляции) для бытовых стиральных машин находится в пределах $c_в = 4000…16000$ Н/м. Суммарное значение диссипации $b$ демпферов системы подвески для бытовых стиральных машин, как правило, находится в диапазоне $b = 200…300$ Н/(м·с) [13].

В табл. 1 приведены расчетные значения режимных параметров, характеризующих резонансную зону, для конструктивных параметров колебательной системы стиральных машин: $M_0 = 40$ кг, $m_ж = 10$ кг, $c_в = 10000$ Н/м, $b = 250$ Н/(м·с).

Таблица 1

Резонансная частота $\omega_p$ колебательной системы стиральной машины

| Загрузка машины $m_0$, кг | Текущее время отжима $\tau_{от.р}$ при резонансной частоте, с | Масса изделий при резонансе $m_{б.р}$, кг | Эксцен-триситет $r_{е.б.р}$, м | Резонансная частота $\omega_p$, рад/с | Неуравновешенная (центробежная) сила $F_{ц.р}$, Н |
|---|---|---|---|---|---|
| 5,0 | 0,82 | 25,68 | 0,0148 | 11,26 | 168,52 |
| 5,5 | 0,81 | 28,25 | 0,0130 | 11,08 | 163,15 |
| 6 | 0,80 | 30,82 | 0,0117 | 10,91 | 160,23 |

Следует обратить внимание, что возникающая при резонансе центробежная сила $F_{ц.р}$ имеет незначительные величины, которые на порядок меньше максимальной неуравновешенной силы $F_{ц\max}$, рассмотренной в работе [8]. Следовательно, воздействие силы $F_{ц.р}$ будет вызывать и незначительные перемещения $\Delta l$ внутренней емкости АБУ. Можно предположить, что в этом случае требуется незначительный диаметр $D_н$ наружной емкости и, соответственно, незначительная масса уравновешивающей жидкости $m_ж$, которая, очевидно, не позволит компенсировать неуравновешенную силу при достижении ее максимального значения $F_{ц\max}$ в процессе отжима.

С учетом резонансной частоты $\omega_p$ и массы внутренней емкости АБУ $m_в$ ее перемещение будет равно:

$$\Delta l = \frac{m_б r_{е.б}\omega^2}{c-\left(m_б+m_в\right)\omega_p^2} \qquad (4)$$

или с учетом (3):

$$\Delta l = \frac{m_б r_{е.б}\omega^2 M^2}{cM^2-\left(m_б+m_в\right)\left(c_в M-\frac{1}{2}b^2\right)}. \qquad (5)$$

Исходя из принятых ранее условий [7, 8], минимальные значения суммарной жесткости упругих элементов АБУ с учетом массы ($m_б + m_в$), где $m_в$ = 1,5 кг, будут равны:

— при $m_0$ = 5 кг $c$ > (25,68 + 1,5) $11{,}26^2$ = 3446,1 Н/м;
— при $m_0$ = 5,5 кг $c$ > (28,25 + 1,5) $11{,}08^2$ = 3652,3 Н/м;
— при $m_0$ = 6 кг $c$ > (30,82 + 1,5) $10{,}91^2$ = 3847,0 Н/м.

Следует отметить, что суммарная жесткость упругих элементов АБУ, необходимая для уравновешивания максимальной неуравновешенной силы $F_{ц\max}$, находится, как было установлено в работе [8], в диапазоне c = 300000…1000000 Н/м. Это существенно (на два порядка!) выше значений жесткости, необходимой для уравновешивания центробежной силы $F_{ц.р}$, возникающей в резонансной зоне периода отжима.

На рис. 1 показана зависимость перемещения $\Delta l$ при загрузке $m_0$ = 5 кг в период разгона барабана для различных значений суммарной жесткости упругих элементов АБУ в диапазоне $c$ = 5000…10000 Н/м для условия уравновешивания центробежной силы $F_{ц.р}$ при резонансе.

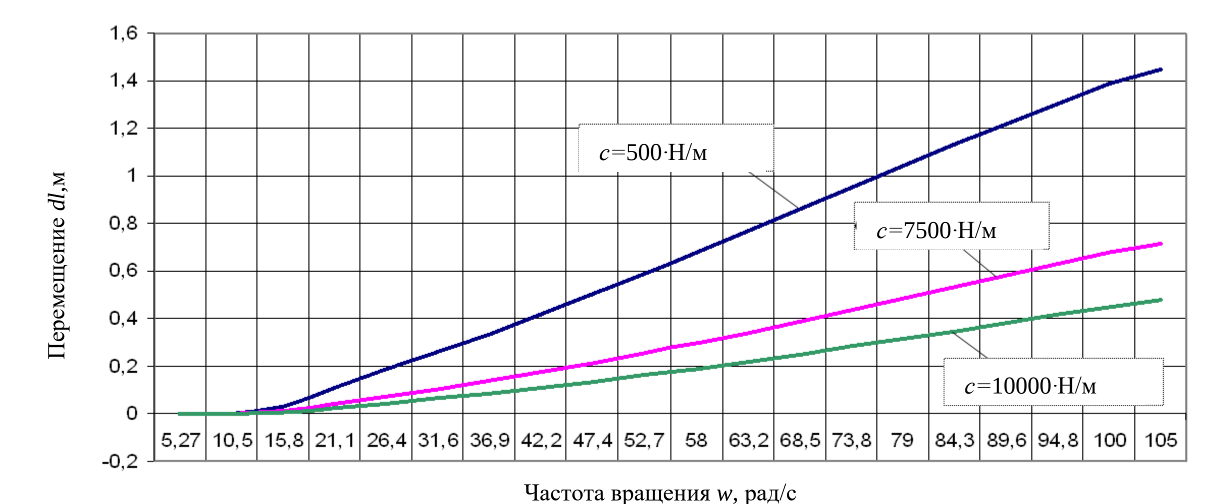



Рис. 1. Зависимость перемещения $\Delta l$ при загрузке $m_0$ = 5 кг в период разгона стирального барабана для условия уравновешивания центробежной силы $F_{ц.р}$ при резонансе

На рис. 2 показана зависимость перемещения $\Delta l$ при загрузке $m_0$ = 5 кг в период разгона стирального барабана для значения суммарной жесткости упругих элементов АБУ $c$ = 400000 Н/м для условия уравновешивания максимальной возмущающей силы $F_{ц\max}$.

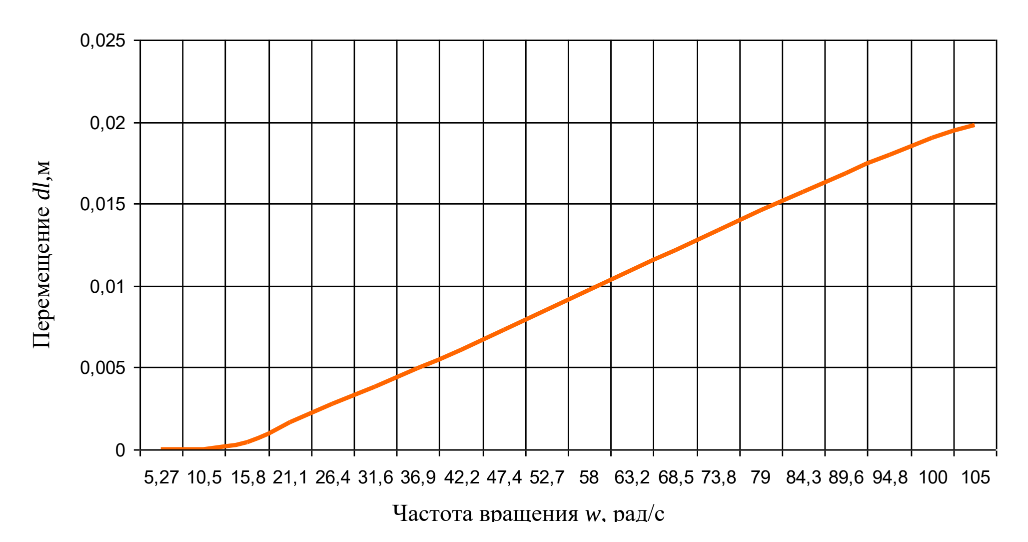



Рис. 2. Зависимость перемещения $\Delta l$ при загрузке $m_0$ = 5 кг в период разгона стирального барабана для условия уравновешивания максимальной возмущающей силы $F_{ц\max}$

Приведем значения перемещения $\Delta l$ в момент прохождения резонанса $\tau_{от.рез}$ и в момент достижения максимальной неуравновешенной силы $\tau_{от.\max}$:

а) для жесткости, выбранной по максимальной неуравновешенной силе $F_{ц.\max}$:

— при $\tau_{от.\max}$ $\Delta l$ = 0,01976 м;

— при $\tau_{от.рез}$ $\Delta l$ = 0,00165 м;

б) для жесткости, выбранной по резонансному режиму при действии силы $F_{ц.р}$:

— при $\tau_{от.\max}$ $\Delta l$ = 0,47604 м; 0,71642 м; 1,44718 м (для жесткостей соответственно $c$ = 5000, 7500, 10000 Н/м);

— при $\tau_{от.рез}$ $\Delta l$ = 0,025500 м; 0,041383 м; 0,107977 м (для жесткостей соответственно $c$ = 5000, 7500, 10000 Н/м).

**Заключение.** Анализ полученных данных показывает рациональность выбора жесткости по максимальной неуравновешенной силе $F_{ц.\max}$. Таким образом обеспечиваются допустимые значения перемещения $\Delta l$ внутренней емкости и, следовательно, формируется соответствующая уравновешивающая сила $F_{ур}$, реагирующая с высокой степенью адекватности на входное силовое воздействие $\Delta F_ц$ практически во всем диапазоне изменения частот ω при отжиме [8].

Вместе с тем жесткость, выбранная для условия уравновешивания центробежной силы $F_{ц.р}$ при резонансе, обеспечивает допустимые значения перемещения $\Delta l$ внутренней емкости только в резонансной зоне вблизи частоты ω = 11,26 рад/с, соответствующей моменту времени отжима $\tau_{от.рез}$. При этом в момент $\tau_{от.\max}$ достижения максимальной неуравновешенной силы $F_{ц.\max}$ значения перемещения $\Delta l$ принимают недопустимые величины, что не позволяет обеспечить формирование соответствующей уравновешивающей силы $F_{ур}$, адекватно реагирующей на входное силовое воздействие $\Delta F_ц$.

Таким образом, наиболее предпочтительным является выбор жесткости упругих элементов АБУ по максимальной неуравновешенной силе $F_{ц.\max}$. Однако в отдельных случаях, когда ставится задача снижения амплитуд колебаний именно при резонансе, более рациональным может представляться использование условий, выбранных для резонансного режима. Полученные в данной работе результаты позволяют произвести рациональный выбор параметров АБУ для данных условий работы стиральной машины.

**Библиографический список**

1. Стиральная машина барабанного типа : патент 2516147 Рос. Федерация : C1D06F 37/00 / С. Н. Алехин [и др.] ; ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС» ; заявл. 28.09.12 ; опубл. 20.05.14, Бюл. № 14. — 6 с.

2. Стиральная машина барабанного типа : патент 2469138 Рос. Федерация : C1D06F 39/00 / С. Н. Алехин [и др.] ; ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС» ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 34. — 5 с.

3. Желтушкин, Л. С. Автобалансировочное устройство жидкостного типа для стиральных машин с центробежным отжимом / Л. С. Желтушкин, С. Н. Алехин // Вестник Сев.-Кавк. гуманитарн. ин-та. — 2013. — № 1 (5). — С. 166–170.

4. Self-Balancing Equipment of Drum-Type Washing Machines / S. N. Alekhin [et al.] // Young scientist USA. — 2014. — Vol. 1, book 5. — P. 9–11.

5. Majewski, T. Fluid automatic balancer for a washing machine / T. Majewski // Memorias del XVI congreso internacional anual de la SOMIM. — Monterrey ; Nuevo León ; México, 2010. — P. 3–12.

6. Urbiola-Soto, L. Liquid self-balancing device effects on flexible rotor stability / L. Urbiola-Soto, M. Lopez-Parra // Shock and Vibration. — 2013. — Vol. 20, iss. 1. — P. 109–121.

7. Алехин, С. Н. Исследование процесса перемещения внутренней емкости автобалансирующего устройства с вытесняемой жидкостью стиральных машин / С. Н. Алехин, Л. С. Желтушкин, А. С. Алехин // Технико-технологические проблемы сервиса. — 2014. — № 3 (29). — С. 32–37.

8. Исследование уравновешивающих сил в жидкостном автобалансирующем устройстве при максимальной неуравновешенной силе / С. Н. Алехин [и др.] // В мире научных открытий. — 2015. — № 8 (68). — С. 9–24.

9. Набережных, А. И. Бытовые стиральные машины : учеб. пособие / А. И. Набережных, Л. В. Сумзина. — Москва : Изд-во МГУС, 2000. — 176 с.

10. Формирование уравновешивающих масс при силовом смещении внутренней емкости автобалансирующего устройства стиральной машины / С. Н. Алехин [и др.] // В мире научных открытий. — 2014. — № 6.1 (54). — С. 640–656.

11. Фетисов, И. В. Исследование случайных воздействий на вибрационные характеристики стиральных машин барабанного типа при отжиме : дис. … канд. техн. наук / И. В. Фетисов. — Шахты, 2011. — 199 с.

12. Алехин, А. С. Исследование и выбор рациональных параметров системы виброизоляции стиральных машин с учетом динамической неуравновешенности барабана : дис. ... канд. техн. наук / А. С. Алехин. — Шахты, 2012. — 184 с.

13. Махов, Д. П. Разработка и исследование способа снижения виброактивности стиральных машин барабанного типа при отжиме : дис. … канд. техн. наук / Д. П. Махов. — Шахты, 2009. — 200 с.

**References**

1. Alekhin, S.N., et al. Stiral'naya mashina barabannogo tipa: patent 2516147 Ros. Federatsiya: C1D06F 37/00. [Drum-type washing machine.] Patent RF, no. 2516147, 2014 (in Russian).

2. Alekhin, S.N., et al. Stiral'naya mashina barabannogo tipa: patent 2469138 Ros. Federatsiya: C1D06F 39/00. [Drum-type washing machine.] Patent RF, no. 2469138, 2012 (in Russian).

3. Zheltushkin, L.S., Alekhin, S.N. Avtobalansirovochnoe ustroystvo zhidkostnogo tipa dlya stiral'nykh mashin s tsentrobezhnym otzhimom. [Auto-balancing fluid-type device for washing machines with centrifugal spinning.] Vestnik Severo-Kavkazskogo gumanitarnogo instituta, 2013, no. 1 (5), pp. 166–170 (in Russian).

4. Alekhin, S.N, et al. Self-Balancing Equipment of Drum-Type Washing Machines. Young scientist USA, 2014, vol. 1, book 5, pp. 9–11.

5. Majewski, T. Fluid automatic balancer for a washing machine. Memorias del XVI congreso internacional anual de la SOMIM. Monterrey; Nuevo León; México, 2010, pp. 3–12.

6. Urbiola-Soto, L., Lopez-Parra , M. Liquid self-balancing device effects on flexible rotor stability. Shock and Vibration, 2013, vol. 20, iss. 1, pp. 109–121.

7. Alekhin, S.N., Zheltushkin, L.S., Alekhin, A.S. Issledovanie protsessa peremeshcheniya vnutrenney emkosti avtobalansiruyushchego ustroystva s vytesnyaemoy zhidkost'yu stiral'nykh mashin. [Research of process of relocation of internal capacity of the autobalacing device with the forced-out liquid of washing machines.] Technico-tehnologicheskie problemy servisa, 2014, no. 3 (29), pp. 32–37 (in Russian).

8. Alekhin, S.N., et al. Issledovanie protsessa peremeshcheniya vnutrenney emkosti avtobalansiruyushchego ustroystva s vytesnyaemoy zhidkost'yu stiral'nykh mashin. [Research of balances in liquid self-balancing device at maximum unbalanced force.] In the World of Scientific Discoveries, 2015, no. 8 (68), pp. 9–24 (in Russian).

9. Naberezhnykh, A.I., Sumzina, L.V. Bytovye stiral'nye mashiny. [Household washing machines.] Moscow: Izd-vo MGUS, 2000, 176 p. (in Russian).

10. Alekhin, S.N, et al. Formirovanie uravnoveshivayushchikh mass pri silovom smeshchenii vnutrenney emkosti avtobalansiruyushchego ustroystva stiral'noy mashiny. [Forming balance masses under power displacement of internal capacity of self-balancing device of washing machine.] In the World of Scientific Discoveries, 2014, no. 6.1 (54), pp. 640–656 (in Russian).

11. Fetisov, I.V. Issledovanie sluchaynykh vozdeystviy na vibratsionnye kharakteristiki stiral'nykh mashin barabannogo tipa pri otzhime: dis. … kand. tekhn. nauk. [Research of random actions on vibration characteristics of the drum washing machine during the spin cycle: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Shakhty, 2011, 199 p. (in Russian).

12. Alekhin, A.S. Issledovanie i vybor ratsional'nykh parametrov sistemy vibroizolyatsii stiral'nykh mashin s uchetom dinamicheskoy neuravnoveshennosti barabana : dis. ... kand. tekhn. nauk. [Research and selection of rational parameters of vibration isolation system of washing machines with dynamic drum unbalance: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Shakhty, 2012, 184 p. (in Russian).

13. Makhov, D.P. Razrabotka i issledovanie sposoba snizheniya vibroaktivnosti stiral'nykh mashin barabannogo tipa pri otzhime: dis. … kand. tekhn. nauk. [Development and research of method of reducing vibroactivity of drum-type washing machine during the spin cycle: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Shakhty, 2009, 200 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 04.05.2016
Сдана в редакцию 04.05.2016
Запланирована в номер 07.07.2016